

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО КАПЕЛЬНОГО ОРОШЕНИЯ НА СКЛОНАХ С ПОДАЧЕЙ ВОДЫ В УГЛУБЛЕНИЕ НА ПОВЕРХНОСТИ

Ю.Я. Гольцов, М.Ю. Храбров

ГНУ ВНИИГиМ Россельхозакадемии, г. Москва, Россия

Много авторов посвятили свои работы определению влажности почвы при капельном орошении. Такие исследования проводили Г.Ю. Шейнкин, М.С. Григоров, Н.Н. Дубенок, И.П. Кружилин, В.В. Бородычев и др. [2, 3, 4, 5, 6].

Среди множества работ по математическому моделированию фильтрации воды и её перераспределению в почве, при капельном орошении выделим работу Skaggs, T. H. [7], где, как и во многих других, отмечают успешность моделирования внутрипочвенного капельного орошения, сравнивая с полевыми данными. Однако, исследования по математическому моделированию капельного орошения в условиях склоновой поверхности земли не отмечаются, если таковые вообще имеются.

Проведение поверхностного капельного орошения на склоновых землях показывает ряд особенностей, одно из которых смещение зоны увлажнения почвогрунта в направления падения склона, что объясняется возникновением мини поверхностного стока. В практике, в определенных ситуациях, для исключения этого явления предлагается осуществлять подачу воды в углубления (лунки) на поверхности почвогрунта определенного радиуса, куда из капельниц подается вода. Такая технология предотвращает поверхностный поток.

Цель настоящей работы состояла в том, чтобы, рассматривая различные сценарии при математическом моделировании, подтвердить правильность выводов, сделанных в [1], которые утверждают, что наличие лунок полностью исключает влияние склона в формировании зоны увлажнения. Развивая моделирование как инструмент оптимизации, можно будет рассматривать все основные факторы, вовлеченные в проектирование системы капельного орошения, включая размеры лунки, интервал между ними, время подачи воды и расход капельниц для данных условий.

Экспериментальные исследования

При капельном поверхностном орошении с различными расходами воды в условиях склона, может наступить момент, когда объём поступающей воды, превышает возможности её полной инфильтрации. Возникает склоновый мини поверхностный поток, который и «обеспечивает» не симметричную зону увлажнения почвогрунта при поверхностном капельном орошении.

Смещение контура увлажнения в сторону от капельницы по склону, в зависимости от расхода капельницы, уклона поверхности земли, и почв, её воднофизических свойств, достигает 1.50...2.,00 м, что делает затруднительным проведение поливов без специальных приемов, обеспечивающих повышение симметричности контура промачивания и

предотвращение эрозии почвы. Перераспределение влаги после полива происходит симметрично увлажненному ранее объему грунта, с выравниванием уровня влажности, особенно в переходной зоне. В связи с этим для формирования симметричного контура на склонах достаточно предотвратить растекание воды, т.е. мини склоновый поток, по поверхности.

С целью проверки правильности этого вывода был заложен опыт, где подача воды осуществлялась в лунку параболической формы диаметром 0,40 м и глубиной 0,20 м, выполненную под капельницей, время заполнения её в опытах составляло около 1 часа.

Наблюдения показали, что при уклоне 0,05 выполнение лунки значительно изменило характер контура увлажнения. Обнаружено как бы две зоны его формирования. Верхняя зона, до глубины лунки, образовала более широкую окружность глубиной до 0,20 м. Глубже формируется цилиндрический контур с большей глубиной промачивания, в средней части контур является по форме проекцией лунки. Общая глубина промачивания составила 1,35 м. Контур, образовавшийся после полива, имеет четкую симметричную форму. Цилиндрический контур вызван проводимостью почвогрунта, который возникает при величине более 0,3 м/сут., что определяется превалированием гравитационного напора над капиллярным.

При уклоне 0,12 наблюдалось закономерное формирование симметричного контура с образованием расширенной зоны увлажнения в верхней части почвенного профиля, при этом глубина промачивания составила 1,50 м. Контур имеет в средней части цилиндрическую форму диаметром до 1,50 м с постепенным уменьшением диаметра в нижней части.

При уклоне 0,2 обнаружились отличия в формировании контура увлажнения. Так, в верхней части прослеживается смещение его относительно лунки по склону, причем в верхней части она смещена относительно основного контура на 0,20 м вниз по склону, а в нижней на 0,40 м. Основная часть контура имеет четко выраженную грушевидную форму, симметричную лунке, при глубине промачивания 1,45 м.

Таким образом, данный опыт показал, что при уклонах 0,05 и 0,12 устройство лунок под капельницами позволяет полностью исключить влияние уклона участка и обеспечить формирование симметричного контура увлажнения, соответствующего по размерам зоне распространения основной массы поглощающих корней виноградной лозы. На уклонах 0,2...0,42 устройство лунок хотя и обеспечивает значительное уменьшение смещения контура в сторону склона, но не исключает его полностью.

Математическая модель

В практике схема расположения системы капельниц поверхностного орошения позволяет принимать их ряд как бесконечный линейный источник [7], что может быть хорошим представлением такой системы капельного орошения. Считая, что почва гомогенна и изотропна, воздушная фаза не затрагивает процессы движения влаги, поток влаги незначителен из-за тепловых градиентов, принимается (выбрана) двумерная профильная модель плоскопараллельного нестационарного движения воды, которая описывается

известным уравнением Richards

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) \right] - Q(x, z, t) \quad (1)$$

где $\theta(x, z, t)$ - объёмная влажность, (L^3/L^3); $h(\theta) = \psi + z$ - гидравлический напор воды почвы, (L); ψ - капиллярный потенциал почвенной влаги потенциал, (L); z - вертикальная координата, с положительным направлением вниз, (L); x - горизонтальная координата, (L); $K(\theta)$ - функция гидравлической проводимости при неполном насыщении почвы, (L/T); t - время (T); $Q(x, z, t)$ - функция источника, характеризующая расход капельниц (в единицу времени) (1/T).

Однозначность рассматриваемого решения уравнения (1) определяется заданием краевых условий (начальные + граничные). Начальные условия (начальный профиль) приняты однородными в горизонтальном направлении, по вертикали возможно наличие слоёв почвогрунта, принимая во внимание их переменную мощность и однородные воднофизические свойства в пределах слоя. Заданный объем воды, подаваемой капельницей, преобразуется в слой воды в лунке, таким образом, на каждом шаге по времени, получаем граничное условие первого рода – переменный во времени напор воды в условиях инфильтрации. По вертикальным границам слева и справа расчетного профиля задаётся условия симметрии, отражая таким образом, «системы капельниц». Снизу рассматриваемого профиля задается «свободное стекание».

Решение

Из-за нелинейности уравнения Ричарда, могут быть получены только относительно немногие упрощенные аналитические решения. Практические применения (1) требуют численного решения, которое может быть получено, используя разнообразие методов, типа конечных разностей или конечных элементов. Мы не обсуждаем использования численных методов, при решении уравнения (1), но отмечаем важность развития графического интерфейса пользователя, чтобы гарантировать принятие и использование пакета программ. Решение уравнения (1) проводится методом конечных разностей. Расчетная область покрывается нерегулярной сеткой, т.е. использовался переменный шаг по пространственным координатам, что повышает точность расчетов. Чтобы соблюдать механизм физики процесса (подача воды в лунку, заполнение лунки и сработка уровня при инфильтрация) вводится набор правил:

1. Разбивка области расчета в поверхностной зоне почвогрунта проводится с шагом Δ по горизонтальной и вертикальной координатам ≤ 0.01 м. При этом обеспечивается, в том числе, реальное представление лунки с заданным радиусом ($R_{\text{лунки}} \approx 0.4; 0.2; 0.12; 0.05$ м) при математическом моделировании.

2. Лунка представляющая (рис. 1) часть круга (в плоскости), покрыта квадратной сеткой. В лунке выделяются горизонтальные слои, начиная с нижней части лунки (основание лунки).

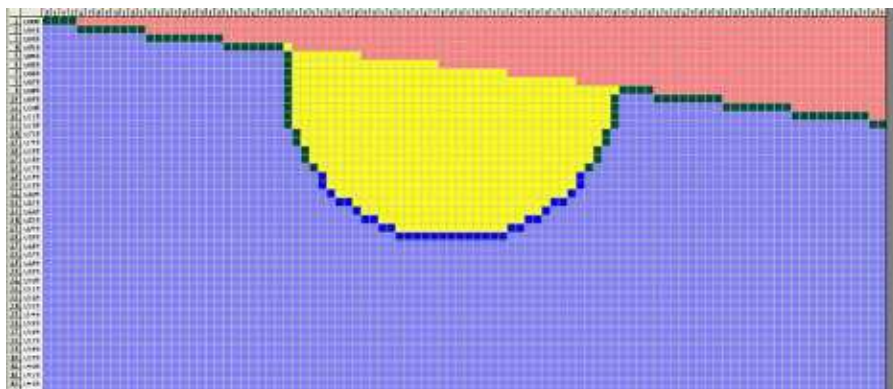


Рисунок 1 – Схема лунки

3. Объем воды подаётся дискретно по периодам Δt , заполняя по слоям лунку. Если подаваемый объем больше объема (площадь) первого, затем первого и второго и т.д. слоев и определяется, тем самым, уровень воды в лунке (напор) в течение этого периода и далее инфильтрацию с этим уровнем воды (напором) по (определяемому) смачиваемому периметру лунки (граничное условие первого рода).

Далее строится алгоритм расчета. Накопление воды в лунке к следующему временному периоду определяется, разницей между объемом подачи воды в данный период и объемом её инфильтрации в течение этого периода.

Для решения используется модифицированный метод Гаусса-Зейделя и метод последовательной верхней релаксации. Итерации прекращались после выполнения следующего условия сходимости

$$\max |h_{i,j}^{k+1} - h_{i,j}^k| \leq \varepsilon \quad (2)$$

где $h_{i,j}$ – функция, отражающая напор в центре блока с координатами (i,j) ; $\varepsilon > 0$ - заданная погрешность вычислений; $k = 0, 1, 2 \dots$ - номер итерации.

Переменный шаг при дискретизации используется и по временной координате.

Воднофизические функции почвы

Для моделирования потока воды в пористых средах неполного насыщения, должны быть определены свойственные почве отношения между гидравлической проводимостью, $K(\psi)$, и капиллярного потенциала, $\theta(\psi)$, с влажностью, т.е. отношения $K - \theta$ и $\psi(h) - \theta$. Функции $K(\psi)$, $\theta(\psi)$ в литературе представлены несколькими различными эмпирическими и теоретическими зависимостями, [8,9,10,11,12]. Исследования, включенные в эту работу используют негистерезисные функции (воднофизических свойств) почвы Голованова-Аверьянова. Функция водоудерживания (отношение $\psi(h) - \theta$) принимают форму:

$$\theta(\psi) = \theta_m + (M - \theta_m) \cdot \exp(-(\psi/(c \cdot h_k))^n), \quad (3)$$

θ_m – максимальная гигроскопичность (L^3/L^3), дол.ед;

M - пористость, дол. ед.;

h_k – высота капиллярного поднятия, L ;

c и **n** неизвестные эмпирические параметры.

Для гидравлической проводимости (отношение **K** - **θ**) в работе используется модель Аверьянова –Голованова с параметром **m**

$$K(\theta) = K_s [(\theta - \theta_m) / (M - \theta_m)]^m \quad (4)$$

где **K_s** – гидравлическая проводимость при полном насыщении.

Подбор параметров **c** и **n** в (3), как и **m** в (4) проводится (рис. 2) с использованием симплекс-метода. Имеющие для этого данные не позволили провести качественный подбор параметров для зависимости Голованова.

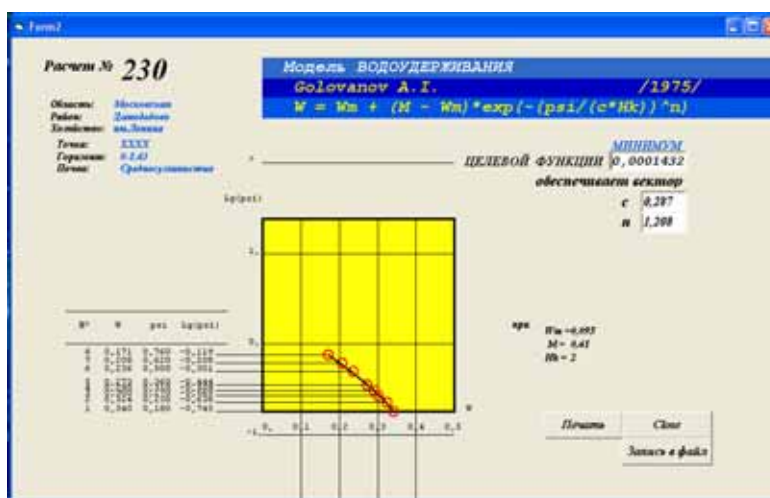


Рисунок 2 - Подбор параметров **c** и **n** с использованием симплекс-метода

Результаты

Для решения уравнения (1) разработан программный пакет. Исходная информация задается с дисплея и/или текстовых файлов, с возможностью выбора данных характеризующих водно-физические свойства почвы, расход капельницы, уклон склона и т.д. Результаты расчетов можно просмотреть на дисплее по каждому периоду в разрезе временных шагов.

Один из сценариев расчета приведен на рисунке 3, а...f в случаях изменения уклона склона, при неизменности всех требуемых других параметров, в частности, **K_s = 0.53м/сут**; **q = 0.096м³/сут**.

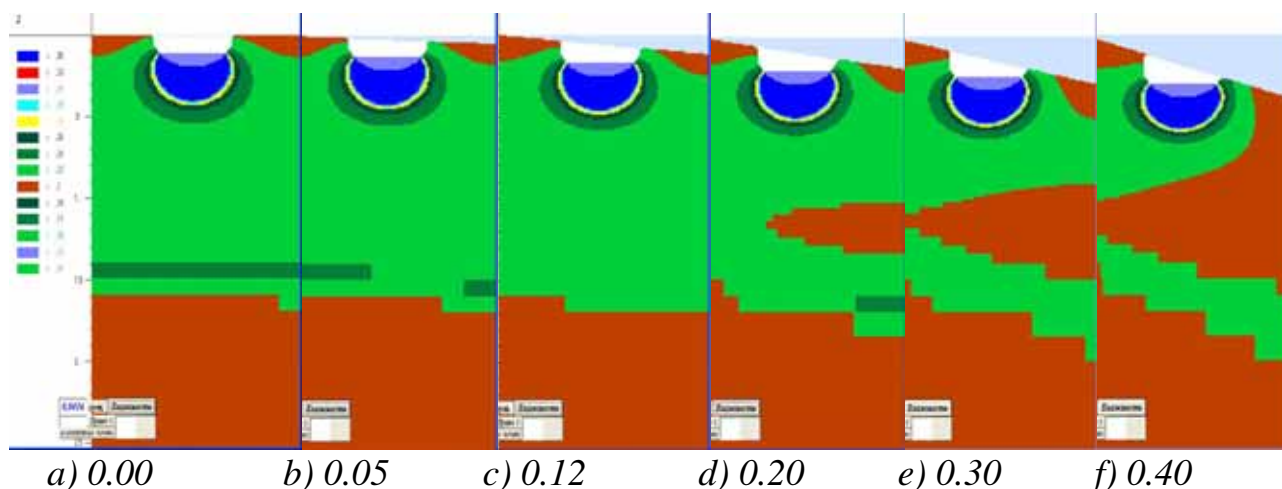


Рисунок 3 - Оценка влияние уклона склона на увлажнение грунта при подаче воды в лунку

В работе [7] для выбранной нами математической модели, представленной уравнением (1), проведена калибровка и ратификация. Желание и необходимость иметь довольно простую модель приводит к ограниченному числу параметров-данных, но приводит к трудностям [7] при калибровке модели требующей количественной близости результатов полевого или лабораторного и вычислительного экспериментов. Следует напомнить, что математическая модель предполагает однородность и изотропность почвогрунта, не учитывается наличие воздушной фазы.

Проведенные эксперименты преследовали цель выявить влияние склона на увлажнение почвогрунта и показать возможность исключения мини поверхностного потока при подаче воды в углубление на поверхности земли. Измерения непосредственно влажности не проводилось, отмечалось только положение контура (зоны) увлажнения при капельном поверхностном орошении. Использовались замеряемые почвогидравлические параметры, типа влажности при полном насыщении θ_s , максимальной гигроскопичности θ_m , гидравлической проводимости K_s при полном насыщении по их доверительным интервалам, чтобы рассматривать почвогидравлические параметры почвы по зависимостям влагоудерживания Голованова (3) и гидравлической проводимости $K(\theta)$ при неполном насыщении (4). Расчеты по всем рассматриваемым сценариям с наборами гидравлических параметров из доверительных интервалов показали правильность выводов относительно использования углублений (лунки) при подаче воды из капельниц на склоне. Форма зоны увлажнения при этом сохраняет симметричный характер.

Заключение

Численные исследования продемонстрировали возможность моделирования поверхностного капельного орошения и правильность сделанных выводов [1] о симметричности расположения контура увлажнения при капельном поверхностном орошении с подачей воды в лунку в условиях склона подтверждены. Хотя представленные результаты являются многообещающими по способности модели рассчитывать режим влажности почв при работе систем капельного орошения, модель должна быть модифицирована для случаев образования поверхностного потока, что

приводит к серьезному усложнению модели при описании главных процессов гидрологии склона.

Следует заметить, что при поверхностном капельном орошении мы уменьшаем «глубинный» сброс части оросительных вод, сохраняя присущий всем поверхностным способам полива потери воды на физическое орошение.

Литература

1. Храбров М.Ю., Ресурсосберегающие технологии и технические средства орошения, дис. на соиск.уч.ст. д.т.н. -М.: ВНИИГиМ, 2008. 266 с.
2. Григоров М.С. Техника подпочвенного полива и ее теоретическое обоснование. /Григоров М.С.// Труды ВСХИ. Том 51, 1976. 3 – 14 с.
3. Дубенок Н.Н. Рекомендации по разработке ресурсосберегающих технологий на мелиорированных склоновых землях. /Дубенок Н.Н.// М. ТСХА. 1991.
4. Кружилин И.П. Оптимизация водного режима почвы для получения запланированных урожаев сельскохозяйственных культур в степной и полупустынной зонах Нижнего Поволжья. Автореф. дис. д-ра сельскохозяйственных наук. /Кружилин И.П.// Волгоград. 1982. с.38.
5. Шейнкин Г.Ю. Капельное орошение на склоновых землях. Опыт проектирования, строительства и эксплуатации систем капельного орошения. /Шейнкин Г.Ю., Митянин Н.П.// Тезисы докл. научно-технического симпозиума. Кишинев. 1981. 46-47 с.
6. Бородычев В.В. Современные технологии капельного орошения овощных культур. /Бородычев В.В.// Волгоград. 2010. с.241
7. Skaggs, T. H., T. J. Trout, J. Šimůnek, and P. J. Shouse, [Comparison of Hydrus-2D simulations of drip irrigation with experimental observations](#), J. of Irrigation and Drainage Engineering, 130(4), 304-310, 2004.
8. Аверьянов С.Ф. Зависимость водопроницаемости почвогрунтов от содержания в них воздуха. Докл.АН СССР, 1949,т.19, №2,с.141-145.
9. Brooks R.H., Corey A.T. Hydraulic properties of porous media. Colorado State University Hudrolody, Paper 3, 1964.
10. Голованов А.И. Прогноз водно-солевого режима и расчет дренажа на орошаемых землях. - Дис.на соиск.уч.ст. д.т.н. -М.: МГМИ, 1975, 307 с.
11. Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res., 12, 513-522.
12. Genuchten, M. Th. van, 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J.1980,v.44. h.892-898.